한국정밀공학회지 제20권 제11호 (2003년 11월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 20, No. 11, November 2003.

표면침탄 열처리강의 초입자연삭 가공시 연삭성 평가

이용철#, 김경년*, 곽재섭**

Grindability Evaluation of Super-Abrasives for Surface Carburized and Heat Treated Materials

Yong Chul Lee#, Gyung Nyun Kim*, Jae Seob Kwak**

ABSTRACT

In this study, an experimental research of grinding characteristics using super-abrasives for surface carburized and heat treated SCM415 materials, which were usually used to make a linear motion guide block and were comparatively hard-to-machine materials, was carried out. In order to conduct a high efficiency and a accuracy grinding of such materials, grinding processes using CBN (Cubic boron nitride) and 38P grinding wheels have been attempted on a surface grinding machine. The grindability according to each grinding conditions was evaluated by means of a grinding force, a surface roughness and a residual stress. The experimental methods and results were presented in this paper. And also, from a proposed truing method the CBN wheels that combined a copper and a break truer gave a full scope to the wheel's performance.

Key Words : Super-abrasives(초입자), Hard-to-machine materials(난삭재), Surface grinding(평면연삭), Grindability (연삭성), Truing method(트루잉 방법)

1. 서론

최근, 기계가공은 고정밀·고속가공을 기반으로 하여 항공, 의료산업뿐만 아니라 정보기기, 메카트로닉스산업 등 첨단산업분야에도 적용되고 있다. 이들 산업분야에서는 특수합금강, 스테인레스강, 알루미늄합금 그리고 표면경화강 등과 같은 기계적 성질이 우수한 재료가 많이 사용되고 있다. 이들 재료들은 대부분 기계가공이 힘든 난삭재에 해당된다. 이러한 난삭재의 가공방법으로는 밀링과 같은 전통적인 기계가공법과 전해가공 등의 특수가공법이 이용되고 있고, 연삭가공도 많은 부분을 차지하고 있다.

이중 난삭재의 연삭가공은 연삭숫돌의 눈메움(Loading)과 날무딤(Glazing) 현상 등이 쉽게 발생하여 정상적인 연삭가공이 이루어지기 어려운 문제점을 가지고 있다[1]. 또한 열전도도가 낮은 재료를 연삭가공할 때 연삭깊이가 과다하거나 연삭숫돌과 공작물과의 접촉면적이 넓으면 연삭 열이 크게 발생하여 연삭입자의 마멸이나 공작물의 균열이 쉽게 일어난다[2-4]. 이러한 문제점을 해결하기 위한 새로운 연삭숫돌과 가공방법들이 개발되고 있다.

특히, 미국의 GE사는 초연마재(Super-Abrasive)라 할 수 있는 다이아몬드와 CBN(Cubic Boron

접수일: 2002년 12월 10일; 게재승인일: 2003년 8월 14일
교신저자: 연암공업대학 정밀기계과
Email: leeyc@yc.ac.kr, Tel: (055) 751-2071
* 거제대학 기계과
** 부경대학교 기계공학부

Nitride)을 1960년대 후반부터 합성하여 연삭분야에 본격적으로 활용하기 시작하였다[5]. CBN는 고경도 입자로 열전달율이 높아 입자가 쉽게 마모되지 않고, 예리한 절삭날을 오래 유지하므로 양호한 절삭을 할 수 있는 장점이 있다. CBN 연삭숫돌의 적용범위는 공구를 연삭하는 작업으로부터 경화강 부품의 정밀연삭까지 다양하며, 난삭재 연삭에 있어서 일반 연마재보다 우수한 가공능률을 나타낸다.

일본에서는 다이아몬드 숫돌로 난삭재 가공시 입자의 돌출이 적고 연삭액의 공급 및 칩의 배출이 곤란해 날무딤이나 눈메움이 쉽게 발생하는 등의 난점을 해결하고자, 기공발생형 레진본드 숫돌(BPF)을 개발하였다[6]. 이 숫돌은 연삭 중에 본드표면에 기공이 발생하여 칩포켓을 형성하므로 연삭액의 공급과 칩의 배출이 용이하여 양호한 연삭가공을 지속시킬 수 있는 특징을 갖고 있다. 또한, TiN계 서멧 재료는 우수한 내마모성, 내금속응착성 때문에 수요가 급증하고 있지만, 그 연삭가공은 초경에 비해 숫돌수명이 극히 짧아지는 단점이 있다. 이를 극복하기 위하여 미쓰비시 머티리얼사에서는 난삭재 가공용 레진본드 KV시리즈를 개발하여 시판하고 있는 등 다양한 형태로 초연마재와 결합제의 개발 및 사용방법을 제시하고 있다[7,8].

본 연구는 직선운동 안내장치(Linear Motion Guide) 블록의 재료로 사용되고 있고, 난삭재인 표면침탄열처리강(SCM415)의 연삭성 극대화 방안을 실험적으로 분석 검토한 것이다. 연삭숫돌은 Al_2O_3 입자에 경도와 인성을 증가시킬 목적으로 Cr_2O_3를 첨가한 개량형인 38P 숫돌과 대표적 초연마제인 CBN 숫돌을 채택하여, 이들 숫돌에 대한 고능률 · 고정밀 연삭의 표면성상을 분석하여 적절한 가공방법 선정에 도움을 주고자 하였다. 또한 초연삭입자로 구성된 CBN 숫돌은 일반적인 트루잉 방법으로는 트루잉을 효과적으로 달성하기 어려우므로 적절한 트루잉 방법을 제시하여 산업현장에서 적용할 수 있도록 하였다.

2. 연삭시스템의 구성

2.1 연삭기 및 숫돌

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 실험장치의 구성 및 평가항목을 개략적으로 도시한 것이다. 실험에 사용된 평면연삭기는 EPG-52S (NAGASE, Japan)이며, 스트레이트 숫돌을 사용하여 각 조건에 따른

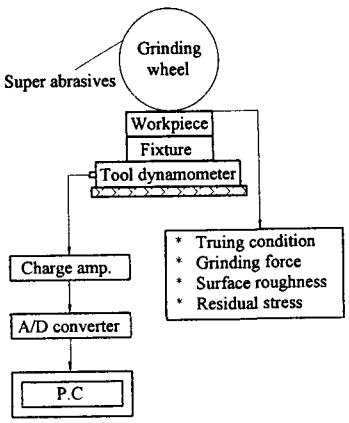


Fig. 1 Experimental setup

평면연삭의 가공특성을 검토하였다. 이 연삭기는 연삭숫돌 축의 자동 밸런싱(Auto balancing) 장치가 부착되어 있고, 최대 5,000rpm까지 스핀들 회전수를 조절할 수 있다. 또한 회전정밀도는 0.5μm 이하를 유지할 수 있고 고속 유정압주축으로 이루어져 있는 NC공작기계이다. 냉각은 수용성 연삭원액을 수도수에 50배 희석하여 사용하였다.

연삭숫돌은 38P와 CBN 숫돌을 사용하였으며, 38P는 일본 미쯔이(Mitsui)사에서 개발한 입자로서 Al_2O_3계열의 입자성분에 Cr_2O_3를 첨가하여 경도와 인성을 증가시켜 난삭재의 연삭에서 연삭비를 높일 수 있는 장점이 있다. 38P 숫돌의 결합제는 입자의 지지력을 보장할 수 있도록 비트리파이드 결합제를 선택하였고, 결합도는 난삭재의 가공에서 자생작용을 원할하게 하기 위하여 다소 연한 H등급을 선택하였다. 한편, CBN 숫돌에서는 레지노이드 결합제를 선택하였으며, 집중도는 100 그리고 CB100 및 200의 황삭, 중삭용 숫돌에서 결합도는 다소 경한 R등급을 선택하였고, 정삭용인 CB500에서는 연삭력 및 표면거칠기 등을 고려하여 연한 J등급의 결합도를 선택하였다. Table 1은 본 연구에 사용된 숫돌의 주요사양을 나타낸 것이다.

Table 1 Specifications for used grinding wheels

Grinding wheel		Dimension(mm)
38P wheel(38P46H11V) 38P wheel(38P80H11V)		D205×T19
CB100R100B CB200R100B	CBN layer : 5mm thick	
CB500J100B		

2.2 피삭재

본 연구에서 사용한 피삭재는 표면침탄열처리강으로 그 용도는 주로 직선운동 안내장치 블록의 소재로 사용되고 있다. 피삭재의 측정경도는 H_RC68로 고경도 소재에 해당한다. Table 2는 피삭재의 화학적 조성을 나타내었고, Fig. 2는 피삭재의 형상을 도시하였다. Fig. 2의 피삭재에서 연삭이 필요한 곳은, 직선운동 안내장치에 이송 대상물이 고정될 상면과 직선운동 안내장치가 가이드 레일을 따라서 움직이는데 필요한 반경 2.5mm인 4 개의 반원부위이다. 본 연구는 상면의 폭 33.6mm와 36mm인 평면 연삭부를 대상으로 하여 실시되었다

Table 2 Chemical composition (% wt) of workpiece

Cr	Mn	Si	In	Lu	Al	Mg
1.29	0.70	0.44	0.42	0.30	0.25	0.24

2.3 연삭조건

현재 산업현장에서 일반적으로 사용하고 있는 Al_2O_3계열이나 SiC계열의 입자로는 난삭재의 연삭에 좋은 효과를 기대할 수 없기 때문에, 초연마제의 채택은 불가결의 선택이라 판단되나, 최근 기존 연삭입자들의 개량형이 개발되고 있으며 가격의 측면 때문에 산업현장에서 상용되고 있다. 예비실험의 결과를 기초로 테이블이송은 0.1m/s, 피치방향 이송은 1.5mm로 일정하게 하고, 숫돌별 연삭속도와 연삭깊이는 Table 3과 같이 설정하였다.

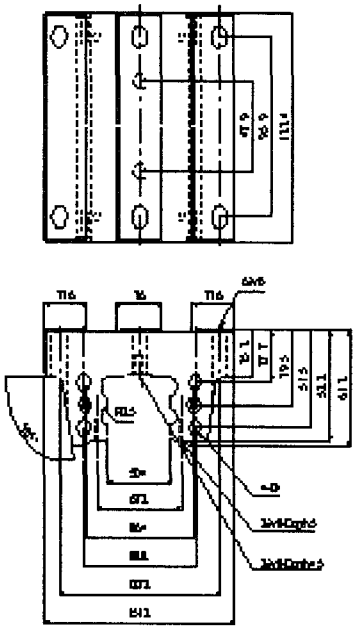


Fig. 2 Dimension and geometry in specimen

Table 3 Grinding conditions

Grinding wheel	Grinding speed (m/min)	Depth of cut (μm)
38P46H11V	966	5, 7, 10, 15, 20 (selectively)
	1160	
38P80H11V	966	
	1160	
CB100R100B	773	
	966	
	1160	
CB200R100B	773	
	966	
	1160	
CB500J100B	773	0.5, 1, 3
	966	
	1160	
	1330	

3. 실험결과 및 고찰

3.1 초연마제 숫돌의 트루잉

초연마제인 CBN 숫돌은 38P계열 숫돌과 같이 단석 다이아몬드 드레서로 트루잉과 드래싱을 달성하는 것이 불가능하다[9,10]. 따라서 연삭성 평가 실험에 앞서 CBN 숫돌의 트루잉 방안에 대한 실험을 실시하였다. 본 연구에서는 CBN 숫돌의 트루잉 방안으로 먼저 브레이크 트루어(Break truer)만 사용할 때, 또 구리 환봉만을 사용할 때, 그리고 구리 환봉과 브레이크 트루어를 조합하여 사용하는 3가지 방법으로 트루잉하고 그 결과를 비교 검토하였다.

브레이크 트루어만을 사용하여 CBN 숫돌을 트루잉할 경우는, 1회당 5㎛씩 절입하여 그 회수를 약 200~300회까지 실시하여도 트루잉이 거의 진행되지 않음을 확인하였다. 이는 CBN 숫돌과 브레이크 트루어 숫돌이 모두 레지노이드 결합제를 채택하고 있고, 브레이크 트루어 숫돌에 사용되는 GC 또는 WA 입자로는 CBN 입자의 연삭이 불가능하거나, 극히 적은 량이 제거되기 때문에 브레이크

트루어에 의한 CBN 숫돌의 초기 트루잉 및 드레싱은 거의 불가능함을 알 수 있었다.

CBN 숫돌의 트루잉에 구리 환봉을 사용하였을 때는, 구리의 높은 인성 때문에 CBN 숫돌의 레지노이드 결합제의 결합력이 부족하여 CBN 입자가 쉽게 탈락하여 트루잉이 짧은 시간에 이루어 질 수 있었다. 그러나 트루잉 속도에 비하여 숫돌 작업면의 기공부에 구리소재가 과다하게 부착되는 눈메움 현상 때문에 추가적인 드레싱 작업이 필요함을 알 수 있었다. 따라서 이 두 가지 트루잉 방법의 장점을 살려 먼저 구리 환봉으로 빠른 시간 내에 숫돌의 진원도를 3~4㎛ 이내로 달성하고, 이 후 브레이크 트루어로 1회당 5㎛씩 2~3회 정도 드레싱을 실시하였다. 그 결과 구리 환봉에 의한·눈메움 현상을 브레이크 트루어로 없앨 수 있어 연삭 가공면의 거칠기를 향상시킬 수 있었다. 이 방법은 브레이크 트루어의 트루잉에 비해 약 60% 이상의 시간을 단축시킬 수 있었고, 또 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 구리 환봉을 이용한 트루잉에 비해 가공물의 표면조도가 약 250%정도 향상됨을 알 수 있었다.

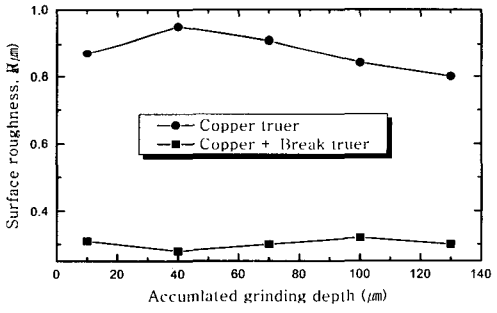


Fig. 3 Comparison of ground surface roughness by different truing methods

3.2 연삭력 특성

본 연구에서 피삭재의 연삭성을 평가하기 위하여, 공구동력계를 이용하여 연삭력의 변동을 측정하였다. 피삭재가 실제 직선운동 안내장치용 블록이므로 그 형상적 특성 때문에 공구동력계에 직접 설치하기가 곤란하여 별도의 전용 고정구(Fixture)를 제작하여 사용하였다.

연삭력은 각 조건별 5회의 가공과 측정을 반복하여 분석하였으며, 측정시 샘플링 시간은 0.03초이고 샘플 데이터의 개수는 10,000개로 하였다. 얻어진 연삭력은 평균연삭력(Average grinding force)과 최대연삭력(Maximum grinding force)으로 구분하여 분석하였다. 이때 최대연삭력은 샘플링된 연삭력의 상위 5%를 평균한 값으로 정의하였다.

3.2.1 누적연삭 깊이의 영향

Fig. 4는 연삭속도가 1160m/min이고 1회당 연삭깊이 10μm로 SCM415 피삭재를 연삭할 때, 입도별 누적연삭 깊이 변화에 따른 법선연삭력(Normal grinding force)을 나타낸 것이다.

38P 숫돌에서는 누적연삭깊이가 증가함에 따른 연삭력은 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 또한 입도 46에서의 연삭력이 입도 80에서의 연삭력 보다 전체 누적연삭 깊이에 걸쳐 약간 높게 나타났으나, 대체로 큰 차이가 없기 때문에 38P 숫돌은 입도별 누적연삭 깊이에 따라서 연삭력은 큰 변화가 없이 극히 안정적인 연삭이 가능함을 보여 주고 있다.

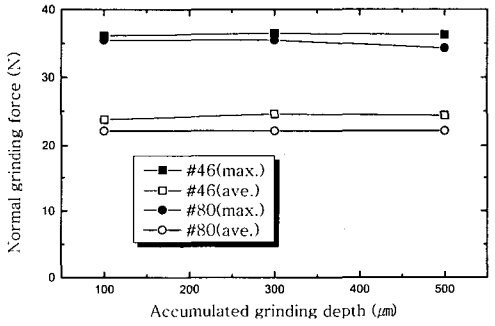


Fig. 4 Normal grinding force according to accumulated grinding depth in 38P wheels

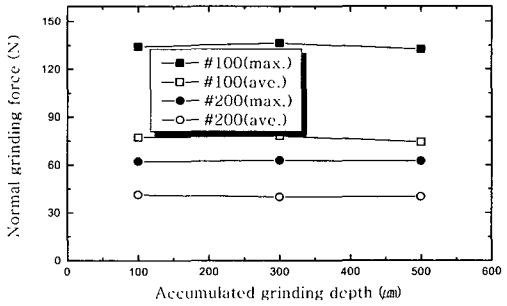


Fig. 5 Normal grinding force according to accumulated grinding depth in CBN wheels

Fig. 5는 CBN 숫돌에서 입도가 100, 200일 때, 누적연삭 깊이의 증가에 따른 법선연삭력을 나타낸 것이다. 입도 100과 200에서 누적연삭 깊이의 증가에 따라서 연삭력은 큰 변화가 없었다. 또한 Fig. 3의 38P 숫돌과 마찬가지로, CBN 숫돌의 입도가 증가하면 즉, 입자 크기가 작아지면 입자절삭날 당 금속제거량이 적어 법선연삭력이 감소함을 알 수 있다.

한편 고능률 경면가공의 가능성을 검토하고자 CBN 입도 500 숫돌을 사용하여 1회당 10μm의 연삭가공을 행한 결과 가공표면에 열손상 자국과 채터 무늬가 관측되어 고능률 연삭은 불가능함을 확인할 수 있었다.

3.2.2 연삭속도의 영향

예비실험을 통하여 연삭조건 선정시, 38P 숫돌은 연삭숫돌의 주속도(연삭속도)가 1160m/min까지는 대체로 안정된 가공면 성상을 얻을 수 있었기 때문에 38P 숫돌의 연삭속도를 1160m/min까지 변화시키면서 실험을 하였다.

Fig. 6에서 연삭속도가 증가함에 따라 38P 숫돌의 연삭력이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 테이블 이송속도가 일정할 경우 연삭속도가 빠를수록, 연삭입자의 크기가 작을수록 입자당 금속제거량이 감소하기 때문에 연삭력이 감소하는 것으로 생각된다. 또한 Fig. 7의 CBN 숫돌에서도 연삭력의 변화 구배에는 차이가 있으나, 38P 숫돌과 마찬가지로 연삭속도가 증가할수록, 입자의 크기가 작아질수록 연삭력이 감소하였다.

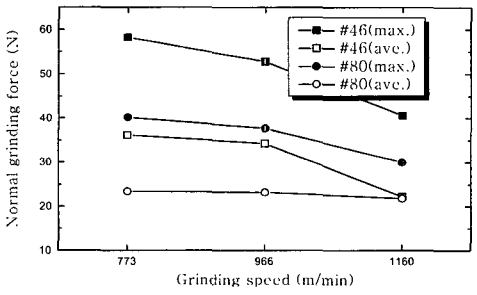


Fig. 6 Normal grinding force according to spindle speed in 38P wheels

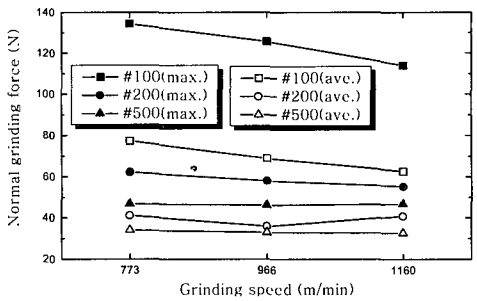


Fig. 7 Normal grinding force according to spindle speed in CBN wheels

3.2.3 연삭깊이의 영향

Fig. 8은 38P 연삭숫돌의 1회당 연삭깊이에 따른 연삭력의 변화를 나타낸 것이다. 연삭깊이가 증가함에 따라서 연삭력이 증가하고, 입자의 크기가 클수록 연삭력은 크게 나타났다. 그러나, 38P 숫돌의 입도 80에서 1회당 연삭깊이 20μm 영역에서 최대연삭저항이 입도 48보다 크게 나타났다. 이는 입도 80 숫돌의 1회당 연삭깊이가 20μm이상으로 증가하면, 연삭숫돌 작업면에 부착되는 과다한 량의 칩을 기공부에서 모두 수용 및 처리할 수 없게되어 연삭력의 상승을 초래하는 것으로 생각되어 진다. 따라서 38P계열의 입도 80 숫돌은 SCM415 피삭재의 고능률 연삭에서 1회당 연삭깊이를 15μm이상으로 사용하지 않도록 하는 것이 필요하다.

한편 Fig. 9에 나타낸 것과 같이 CBN 숫돌에서는 선택한 입도가 38P 숫돌에 비하여 상대적으로

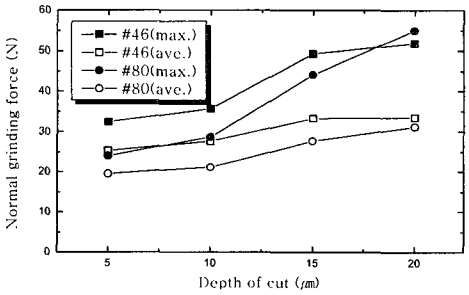
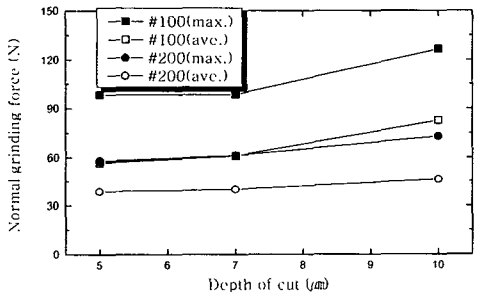


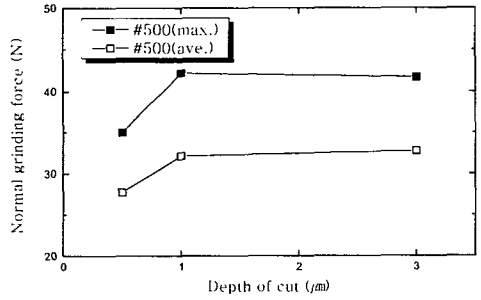
Fig. 8 Normal grinding force according to depth of cut in 38P wheels

미세하여 1회당 연삭깊이를 38P 숫돌과 같이 크게 할 수 없기 때문에, 입도 100과 200 숫돌에서는 연삭깊이 5, 7, 10μm에서 연삭력을 평가하였고, 입도 500 숫돌의 연삭깊이는 0.5, 1, 3μm에 연삭력을 분석하였다. 38P 숫돌에서와 마찬가지로 연삭깊이가 증가할수록, 연삭입자의 크기가 클수록 연삭력은 증가하였다.

이상의 연삭력 결과들로부터 38P 숫돌 보다 CBN 숫돌에서 연삭력이 크게 증가하였는데 이는 입자의 크기에 따른 영향과 결합제 및 입자의 강도 등의 영향이 복합적으로 작용한 것으로 볼 수 있고, 누적연삭 깊이 변화에 따라서 두 가지 종류의 숫돌 모두 연삭력은 큰 변화없이 안정적으로가공할 수 있었다. 또한 연삭속도를 증가시키면 연삭력은 다소 감소하고 연삭깊이를 증가시키면 연삭력이 증가함을 확인하였다.



(a) CB100(200)R100B



(b) CB500J100B

Fig. 9 Normal grinding force according to depth of cut in CBN wheels

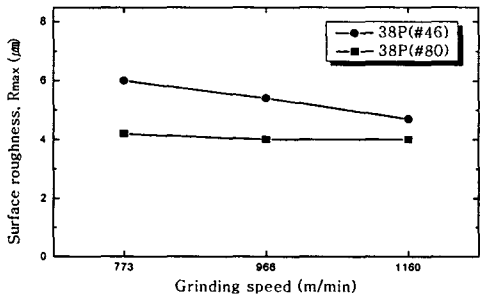
3.3 표면거칠기 특성

본 연구에서는 예비실험을 통해서 얻어진 조건으로 연삭가공된 피삭재의 표면거칠기를 평가하였다. 표면거칠기의 측정에 있어서 측정위치는 시험편 길이를 등 간격으로 5등분하여 5곳에서 최대표면거칠기(R_{max})를 측정하였으며, 측정위치에 따른 거칠기 값의 편차를 고려하여 그 평균치를 본 연구의 평가 데이터로 사용하였다. 또한 연삭가공면에 나타나는 열손상 무늬 등은 표면거칠기에는 거의 영향을 미치지 않지만, 제품의 양부에 영향을 미치므로 가공면의 외관검사를 통해 결함을 관찰하였다.

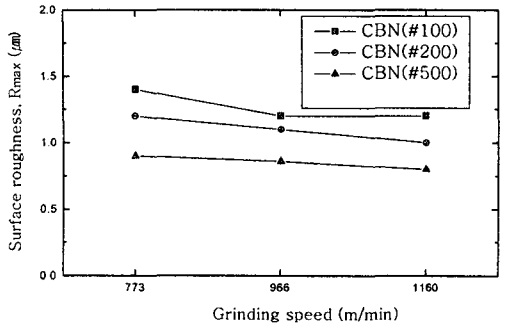
3.3.1 연삭속도의 영향

Fig. 10은 연삭속도 변화에 따른 38P 숫돌과 CBN 숫돌의 표면거칠기를 나타낸 것이다. 38P 숫돌과 CBN 숫돌 모두 연삭속도가 빠를수록 또한 입자의 크기가 작아질수록 표면거칠기가 좋아짐을 알 수 있다. 이는 절삭속도가 빨라지고 입자가 작아지면 입자당 금속제거량이 적아져서 좋은 연삭 표면을 얻을 수 있기 때문이다.

그런데 Fig. 6과 7에서 나타낸 것과 같이 CBN 입도 100 숫돌이 38P 입도 46 숫돌보다 연삭력이 약 2배정도 크게 나타났음에도 불구하고, Fig. 10에 나타난 것과 같이 CBN 입도 100 숫돌이 38P 입도 46 숫돌보다 표면거칠기는 매우 양호함을 알 수 있다. 이것은 정상적인 연삭상태에서는 연삭력과 표면거칠기는 서로 무관하고 입자의 크기가 지배적인 영향을 미침을 보여주는 것이다. 한편 CBN 입도



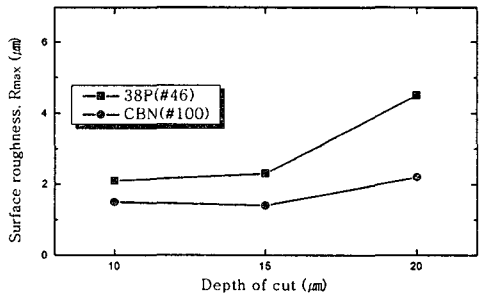
(a) 38P46H11V and 38P80H11V



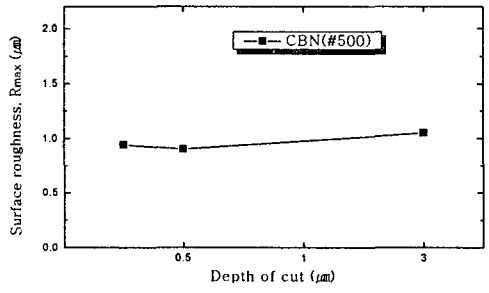
(b) CB100R100B, CB200R100B and CB500J100B

Fig. 10 Surface roughness according to grinding speed in 38P and CBN wheels

500 숫돌의 경우에는 최대표면거칠기가 1μm이내인 양호한 가공면을 얻을 수 있었다.



(a) 38P46H11V and CB100R100B



(b) CB500J100B

Fig. 11 Surface roughness according to depth of cut

3.3.2 연삭깊이의 영향

Fig. 11은 연삭깊이에 따른 표면거칠기를 나타낸 것이다. 38P 숫돌과 CBN 입도 100 숫돌은 고능률 연삭을 위해서 연삭깊이를 10, 15, 20μm로 변화시켰고, CBN 입도 500 숫돌은 금속 제거능률을 고려하여 0.5, 1, 3μm의 경우 표면거칠기를 측정하였다. 연삭깊이가 증가할수록, 또한 연삭입자의 크기가 클수록 표면거칠기는 나빠짐을 확인하였다.

3.3.3 연삭회수의 영향

연삭회수의 증가에 따른 표면거칠기의 변화는 생산성과 직결되는 문제로 산업현장에서는 매우 중요하다. 따라서 연삭회수가 증가함에 따른 SCM415 피삭재의 표면거칠기 변화를 측정하였으며, Fig. 12에 그 결과를 도시하였다.

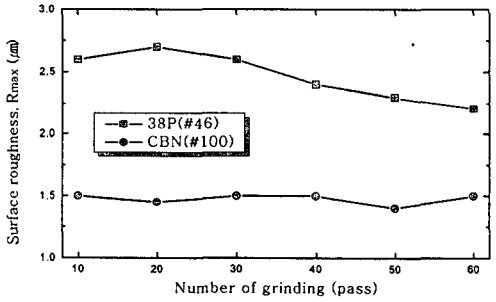


Fig. 12 Surface roughness according to the number of grinding

Fig. 12의 결과에서 알 수 있듯이 CBN 숫돌은 연삭회수에 크게 영향을 받지 않고 거의 일정한 표면거칠기를 나타내었다. 반면 38P 숫돌은 연삭회수가 증가함에 따라서 표면거칠기가 다소 향상됨을 알 수 있다. 이것은 38P 숫돌 입자가 연삭이 진행됨에 따라서 서서히 마모되어 평탄화되고, 마모된 입자는 원활한 절삭이 이루어지지 않아서 피삭재 표면에서 미끄럼 현상이 일어나서 표면거칠기가 오히려 좋아지는 현상이 나타났다. 그러나 이러한 미끄럼 현상은 피삭재 표면전체에서 균일한 것이 아니므로 실제 표면거칠기의 향상을 기대하기는 어렵다.

이상의 표면거칠기 측정 및 분석의 결과로서, CBN 숫돌을 이용하여 SCM415 피삭재를 연삭가공하면 매우 안정적인 표면거칠기를 얻을 수 있음을

알 수 있다.

3.4 잔류응력 특성

잔류응력의 측정에 있어서 전단계의 가공에 의한 영향을 줄이기 위하여 1차에서 15μm씩 100회, 2차에서 2μm씩 30회 피삭재 표면을 연삭하고 실험을 실시하였다. 잔류응력의 측정은 x-ray 회절법을 이용하였으며, 측정입사각은 -25°~25°까지 변화시키면서 측정하였다.

Fig. 13은 연삭속도가 1160m/min이고 1회당 연삭깊이가 15μm일 때, 공작물 표면의 잔류응력치를 나타낸 것이다. 가공면의 표면에는 인장 잔류응력(Tensile residual stress)이 잔존해 있음을 알 수 있다. 연삭가공중에 가공면은 높은 연삭온도에 의해서 팽창하고, 그때 생성된 표면은 가공이 완료되면 냉각에 의해서 압축되어 최종적으로 피삭재의 표면형상은 미시적으로는 오목한 형상(Concave shape)이 된다. 따라서 피삭재는 수평상태로 회복할려고 하는 인장력이 생기고, 그에 상응하는 인장 잔류응력이 발생한다.

한편 잔류응력의 크기는 연삭력의 크기에 비례하여, 38P 숫돌보다는 CBN 숫돌이 상대적으로 잔류응력이 크게 나타났고, 동일 계열 숫돌에서는 입자의 크기가 클수록 잔류응력이 크게 나타났다. 이상의 결과로부터 피삭재의 표면 잔류응력은 법선연삭력의 크기에 지배적인 영향을 받음을 알 수 있었다.

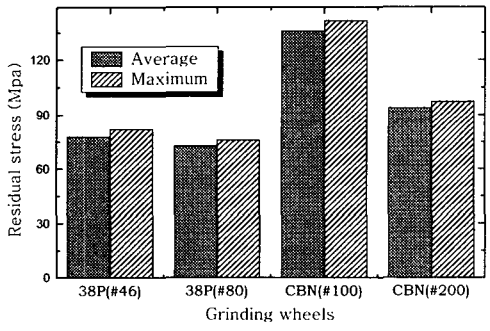


Fig. 13 Measured residual stress according to grinding wheels

4. 결론

본 연구는 산업현장에서 직선운동 안내장치로 사용되는 난삭재인 SCM415 피삭재를 38P 숫돌과 CBN 숫돌을 이용하여 연삭가공하였으며, 실험결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. CBN 숫돌의 트루잉시 브레이크 트루어와 구리 환봉을 각각 이용할 때와 구리 환봉과 브레이크 트루어를 조합하여 투루잉 실험을 실시한 결과, 구리 환봉과 브레이크 트루어를 사용할 때가 브레이크 트루어만을 사용할 때에 비해 약 60% 이상의 시간을 단축시킬 수 있었고, 구리 환봉을 이용할 때에 비해 가공물의 표면조도가 약 250%정도 향상됨을 알 수 있었다.
2. 공구동력계를 이용한 법선 연삭력을 측정하여 분석한 결과 38P 숫돌 보다 CBN 숫돌에서 연삭력이 크게 증가하였는데 이는 입자의 크기에 따른 영향과 결합제의 영향이 복합적으로 작용한 것으로 볼 수 있고, 누적연삭 깊이 변화에 따라서 두 가지 종류의 숫돌 모두 연삭력은 큰 변화 없이 안정적으로 연삭할 수 있었다.
3. 연삭가공 후 피삭재의 표면거칠기를 분석해본 결과 정상적인 연삭상태에서는 연삭력과 표면거칠기는 서로 무관하고 입자의 크기가 표면거칠기에 지배적인 영향을 미침을 확인할 수 있었다. 또한 CBN 숫돌을 이용하여 SCM415 피삭재를 연삭가공하면 매우 안정적인 표면거칠기를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.
4. 연삭가공면의 표면 잔류응력을 x-ray 회절법을 이용하여 분석한 결과, 피삭재의 표면에는 인장 잔류응력이 발생함을 확인하였고, 이때 잔류응력의 크기는 동일 계열 숫돌에서는 입자의 크기가 클수록 잔류응력이 크게 나타났다. 특히 잔류응력은 법선연삭력이 직접적으로 영향을 미침을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. Yamaguchi, K., Horaguchi, I. and Sato, Y., "Grinding with Directionally Aligned SiC Whisker Wheel Loading-free Grinding," Precision Engineering, Vol. 22, No. 2, pp. 59-65, 1998.
2. Zarudi, I. and Zhang, L. C., "A Revisit to Some Wheel-Workpiece Interaction Problems in Surface Grinding," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 42, No. 8, pp. 905-913,

2002.

3. Ge, P. Q., Liu, W. P., Liu, Z. C., Lu, C. H. and Li, J. F., "Fuzzy Clustering Analysis of the Grinding Burn Damage Level of a Workpiece Surface Layer," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 129, No. 1, pp. 373-376, 2002.
4. Peng, Y., Grano, S., Ralston, J. and Fornasiero, D., "Towards Prediction of Oxidation during Grinding," Minerals Engineering, Vol. 15, No. 7, pp. 493-498, 2002.
5. Jackson, M. J., Davis, C. J., Hitchiner, M. P. and Mills, B., "High-speed Grinding with CBN Grinding Wheels - Applications and Future Technology," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 110, No. 1, pp. 78-88, 2001.
6. Kawahasi, N., "Characteristics and Effective Use of BPF Wheel for High Precision and Accuracy," Monthly Mechanical Technology, pp. 100-106, 1997.
7. Tanaka, T. and Isono, Y., "New Development of a Grinding Wheel with Resin Cured by Ultraviolet Light," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 113, No. 1, pp. 385-391, 2001.
8. Luo, S. Y., Liao, Y. S., Chou, C. C. and Chen, J. P., "Analysis of the Wear of a Resin-Bonded Diamond Wheel in the Grinding of Tungsten Carbide," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 69, No. 1, pp. 289-296, 1977.
9. Lim, H. S., Fathima, K., Kumar, A. S. and Rahman, M., "A Fundamental Study on the Mechanism of Electrolytic In-process Dressing (ELID) Grinding," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 42, No. 8, pp. 935-943, 2002.
10. Phanindranath, V. and Babu, N. R., "A Theoretical Model for Prediction of Groove Geometry on Laser Dressed Grinding Wheel Surface," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 36, No. 1, pp. 1-16, 1996.